第30卷 第5期 材 料 研 究 学 报 Vol. 30 No. 5
2016年5月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH May 2016

聚氨酯涂层对复合材料层合板抗反复低速冲击性能的影响*

岳海亮[1] 张国利[1] 王壮志[2] 郭瑞彦[1]

1. 天津工业大学复合材料研究所 教育部先进纺织复合材料共建重点实验室 天津 300387
2. 威海光威复合材料股份有限公司 威海 264200

摘 要 本文采用模压成型工艺制备出三种不同厚度的复合材料层合板,对其表面进行喷砂粗糙处理后喷涂相同厚度聚氨酯,制备聚氨酯喷涂复合材料层合板。使用落锤冲击试验机反复冲击复合材料裸板与喷涂过聚氨酯的复合材料层合板,直到其完全穿透,通过超声波C扫描检测对冲击后试样的分层面积进行分析。结果表明:随着冲击能量增大,聚氨酯对复合材料层合板抗反复冲击性能的影响逐渐减弱,冲击后试样的损伤面积逐渐增大;随着层合板厚度的增加,聚氨酯对复合材料层合板抗反复冲击性能的影响增强,致使试样冲击后损伤面积减小。

关键词 复合材料,聚氨酯涂层,吸收能量,冲击损伤面积,最大冲击载荷,抗反复冲击性能

分类号 TB332 文章编号 1005-3093(2016)05-0379-09

Evaluation of Ressistance to Repeated Low-Velocity Impact of Composite Laminates with Polyurethane Coating

YUE Hailiang[1] ZHANG Guoli[1**] WANG Zhuangzhi[2] GUO Ruiyan[1]

1. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Tianjin and Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300387, China

2. Weihai Guangwei Composites Material Co., Ltd, Weihai, 264200, China

*Supported by the Planned Science and Technology Project of Tianjin No.13TXSYJC40500 and Tianjin City High School Science & Technology Fund Planning Project No.2012ZD02.

Manuscript received October 12, 2015; in revised from December 3, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (022)83955899, E-mail: guolizhang@tjpu.edu.cn

ABSTRACT The resistance to repeated low-velocity impact of PU coated composite laminates of different thickness was evaluated. The composite laminates were fabricated by compression molding method, and then were sand-blasted in order to increase their surface roughness, and finally were coated with PU of the same thickness. The composite laminates with and without PU coating were impacted repeatedly using a pressure-assisted Instron-Dynatup 9250 instrumented drop-weight impact tester until all the specimens were perforated, and then ultrasonic C-scan was used to detect the delimitation area after testing. It is observed that the influence of PU on the resistance to repeated impact of composite laminates is gradually decreasing after repeated impacting with the increasing of impacted energy, so the damage area of specimens are increasing after repeated impact. In addition, with the increasing thickness of composite laminates, the influence of PU acting on the resistance to repeated impact for all laminates is enhanced so that the damage area of specimens is gradually decreasing.

KEY WORDS composite, polyurethane coating, absorbed energy, impact damage area, maximum impact force, repeated impact performance

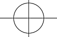
复合材料结构具有比强度高、比模量大和可设计性强等独特优点,随着复合材料制造技术的不断改进,其生产成本不断降低,复合材料已经广泛应用于航空、船艇、汽车、建筑等各个领域,成为不可或缺的材料之一[1, 2]。复合材料结构在制造、日常维护和服役过程中某些位置经常遭受外来物体的反复冲击,反复冲击损伤的累积会导致复合材料结构性能

* 天津市科技计划项目13TXSYJC40500和天津市高等学校科技发展基金计划项目2012ZD02资助。

2015年10月12日收到初稿;2015年12月3日收到修改稿。

本文联系人:张国利,研究员

DOI: 10.11901/1005.3093.2015.570



的严重退化，影响其安全使用和寿命[3-5]。

对于复合材料抗反复冲击的研究，国内外学者主要从树脂增韧、层间增韧、沿厚度方向缝合或者纤维混杂等几个方面来提高复合材料抗反复冲击性能[6-11]。目前，关于纤维混杂提高复合材料抗反复冲击性能的研究较多，Sevkat等[12]研究发现，通过适当比例的纤维混杂和选择合适的铺层结构可以有效地减弱多次冲击后造成的损伤。Morais等[13]研究了在两种不同的冲击能量下，玻纤、碳纤和芳纶纤维的混杂对其抗反复冲击性能的影响，研究发现增加玻纤混杂比例，其抗反复冲击性能下降越快。而通过在复合材料表面增加保护层提高复合材料抗冲击性能的研究较少，Rahmé等[14]研究了含机械保护层复合材料层合板的单次低速冲击及冲击后压缩性能，并与裸板对比，结果表明保护层增加了层合板的冲击阻抗和冲击后损伤容限，何为等[15]使用涂漆、加铜网等措施对碳纤维复合材料层合板进行表面防护，研究了其单次低速冲击和冲击后压缩性能，发现表面防护层对复合材料层合板的冲击性能有显著的影响。

目前针对保护层提高复合材料的抗反复冲击性能的研究未见文献报道。本文将聚氨酯喷涂到复合材料层合板表面，通过落锤冲击试验分析聚氨酯喷涂层合板在不同冲击能量反复冲击下的损伤规律，探讨复合材料层合板反复冲击的损伤机理，通过与裸板对比，研究聚氨酯涂层对不同厚度复合材料层合板抗反复冲击性能的影响，为其在航空航天领域的应用提供一定的设计依据和理论基础。

1 实验方法

1.1 原材料与设备

碳纤维环氧树脂预浸料，树脂含量为40%，威海光威复合材料有限公司生产；聚氨酯，NR-95LVHS，抗拉强度是24.1 MPa，河北省秦皇岛正美豪有限公司生产。

聚氨酯双组份喷枪，秦皇岛正美豪有限公司制造；喷砂机，天津百通机械有限公司制造；平板硫化机，广东省东莞市正文机械有限公司制造；Instron Dynatup 9250HV 落锤冲击试验机，美国Instron公司制造；SN-C3409水浸超声扫描检测系统，北京北极星辰科技有限公司制造；切割机，天津工业大学复合材料所自制。

1.2 试样制备

采用模压成型工艺制作碳纤维复合材料层合板，将碳纤维预浸料按规定尺寸裁剪，然后在几何尺寸为300 mm×300 mm的模具内正交铺层，铺层层数分别为12层、14层和16层，单层厚度为0.175 mm，成型后层合板厚度分别为2.0 mm、2.4 mm和2.8 mm，分别用$[0/90]_6$、$[0/90]_7$和$[0/90]_8$表示。

为了提高聚氨酯涂层和层合板之间的界面粘结强度，采用表面喷砂处理技术对试样表面进行处理，所用石英砂规格为46目，喷砂压力为1 MPa，喷砂嘴距试样距离为10 cm。

将试样表面用毛刷均匀刷涂一层底漆，然后将聚氨酯A、B组份在50℃烘箱内放置15 min，取出后装在喷枪上，喷涂压力为0.4 MPa，喷嘴距试件距离为30 cm，反复喷涂三遍，使涂层的厚度大约为1 mm，30 min后聚氨酯完全固化。用游标卡尺测量试样厚度分别为3.0 mm、3.4 mm和3.8 mm，分别用$[0/90]_6$-PU、$[0/90]_7$-PU和$[0/90]_8$-PU表示。最后将试样用切割机裁剪成150 mm×100 mm的冲击试样，试样的具体结构参数如表1所示。

1.3 性能测试

(1) 低速冲击试验

本试验采用标准ASTM D 7136《测量纤维增强聚合物基复合材料耐落锤冲击破坏的标准试验方法》。冲头直径为12.7 mm，质量为6.5 kg。试验时，通过调整落锤的高度改变冲击能量，冲击过程结束时采用回弹装置以防止对试件的二次冲击。

(2) 超声波C扫描测试

对冲击后复合材料层合板进行超声C扫描检测，获得冲击后试样的超声波C扫描图像，以观察层合板内部损伤状况，然后用Image Pro Plus软件计算损伤面积。

2 结果和讨论

2.1 不同冲击能量的单次冲击

为了初步了解聚氨酯喷涂复合材料层合板的冲击响应特点，先采用3 J、5 J、6.5 J、7.5 J、9 J、12.5 J共6种不同的冲击能量对 $[0/90]_6$-PU试样进行单次冲击，得到如图1a和图1b所示的不同冲击能量的冲击

表1 试样的结构

Table 1 Structure parameters of specimen

Code of specimen	Number of layers	Thickness /mm	Weight /g
$[0/90]_6$	12	2.0	56.2
$[0/90]_7$	14	2.4	59.5
$[0/90]_8$	16	2.8	62.7
$[0/90]_6$-PU	12	3.0	66.7
$[0/90]_7$-PU	14	3.4	69.8
$[0/90]_8$-PU	16	3.8	73.2

载荷-时间曲线和冲击载荷-位移曲线。

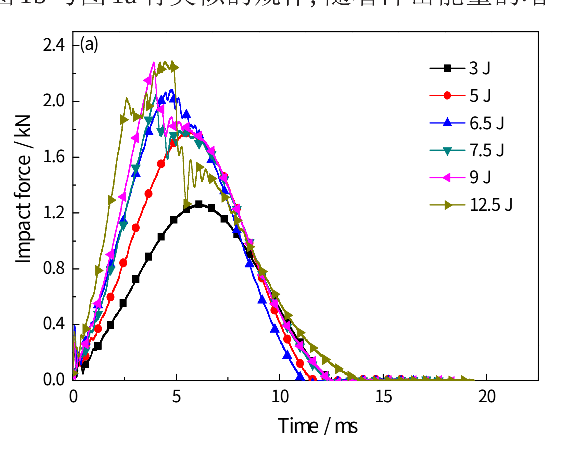
当冲击能量为3 J和5 J时, 单次冲击后观察试件, 在试件冲击正面与冲击背面均没有出现目视可见损伤, 由图1a可知, 冲击载荷-时间曲线光滑, 加载和卸载近似左右对称, 说明当冲击能量不大于5 J时, 试件冲击以弹性响应为主; 当冲击能量增至6.5 J时, 冲击载荷-时间曲线超过最大冲击载荷2.1 kN后会出现锯齿状的波纹, 此时试样冲击正面没有损伤, 而背面出现了与纤维方向平行的基体裂纹, 使层合板刚度退化, 导致载荷在小范围内波动; 当冲击能量增大到7.5 J和9 J时, 试样冲击正面出现凹坑, 冲击背面出现纤维断裂, 达到最大冲击载荷后, 载荷突然急剧下降, 应力重新分布, 试样继续承受冲击载荷, 直到冲头离开; 当冲击能量增大到12.5 J时, 此时试件冲击正面的聚氨酯层已经破坏, 而冲击背面层合板向外凸出, 冲击载荷-时间曲线有两个峰值, 第一个峰值是聚氨酯涂层破坏时的载荷, 第二个峰值是复合材料层合板破坏时的载荷, 且出现第二个峰值后载荷下降幅度更大。

图1b与图1a有类似的规律, 随着冲击能量的增大, 试样的弯曲变形逐渐增大, 且增加幅度也在变大。在冲击载荷-位移曲线中直线段的斜率表示层合板的弯曲刚度, 随着冲击能量的增大, 层合板的弯曲刚度也缓慢的增加。

2.2 不同冲击能量的反复冲击

根据上述分析选择5 J、6.5 J和7.5 J三种冲击能量对[0/90]$_6$和[0/90]$_6$-PU进行反复冲击至试样完全穿透。三种冲击能量对应的冲击载荷-时间曲线分别如图2、图3和图4所示。

相比于[0/90]$_6$裸板试样, [0/90]$_6$-PU聚氨酯喷涂复合材料层合板在相同冲击能量5 J、6.5 J和7.5 J作用下, 冲击载荷更大, 冲击接触时间更短, 冲击位移更小。这是因为聚氨酯涂层吸收了大部分冲击能量, 产生弹性变形, 聚氨酯涂层和层合板恢复形变共同抵抗冲击, 所以冲击载荷增大; 由于聚氨酯吸收了部分冲击能量, 所以冲头下降的位移减小, 冲击接触时间变短。对于[0/90]$_6$, 三种冲击能量的第一次冲击曲线均出现了锯齿形波纹, 最大冲击力都在1.5 kN左右, 随着冲击能量的增加, 曲线的震荡也越来越显著, 最大冲击力出现的时间也越来越早。这说明第



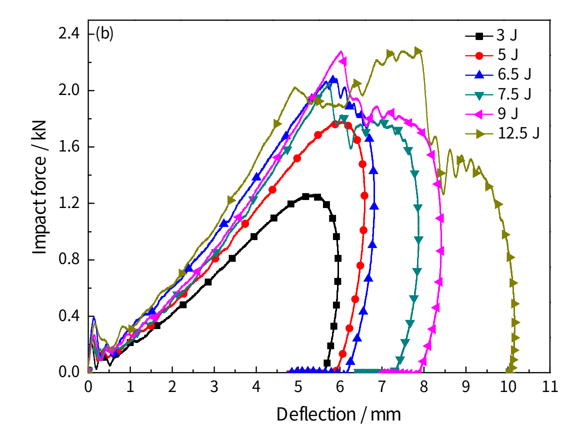
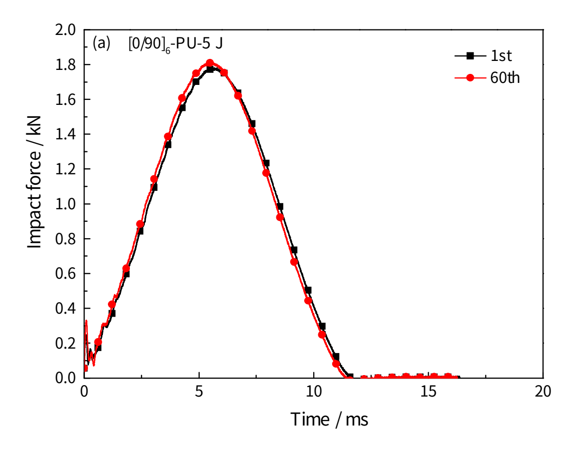


图1 [0/90]$_6$-PU在不同冲击能量下的冲击力-时间曲线和冲击力-位移曲线

Fig.1 Impact force-time curve (a) and impact force-deflection curve (b) of [0/90]$_6$-PU with different impact energies



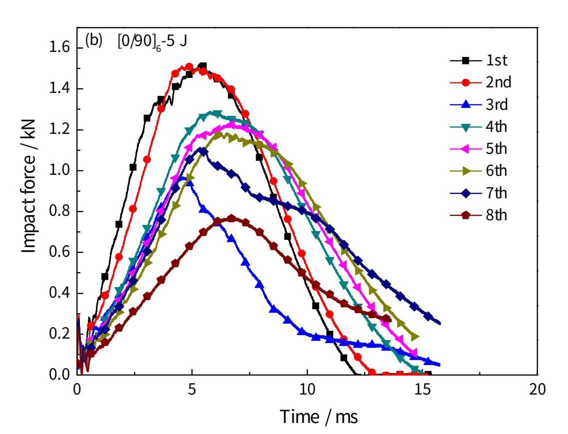
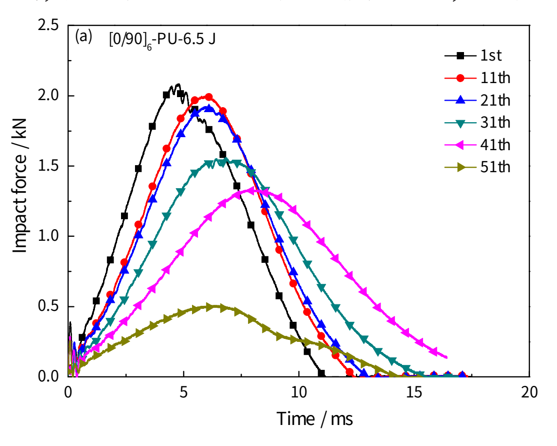


图2 5 J反复冲击时的冲击力-冲击时间曲线

Fig.2 Repeated impact force-time curves of [0/90]$_6$-PU (a) and [0/90]$_6$ (b) at 5 J

一次冲击就造成了试样的损伤, 而且随着冲击能量的增大, 裸板损伤的程度也越来越严重。第一次冲击曲线出现较大震荡的原因是冲击产生的应力波在均匀无缺陷的介质中传播, 在接下来的冲击中, 应力波在试样新产生的裂纹处反射, 反射波与入射波相互作用使曲线震荡逐渐衰减。而对于$[0/90]_6$-PU试样, 当冲击能量为5 J和6.5 J时, 除了第一次冲击曲线有震荡, 接下来的冲击曲线是近似光滑的, 直到试样开始穿透, 这是因为冲击产生的应力波在原来冲击产生裂缝中释放, 使基体裂纹扩展, 而没有引起更严重的破坏形式; 当冲击能量为7.5 J时, 由于冲击能量增大使冲击产生的应力波不能在裂缝中完全释放, 导致层合板冲击背面出现纤维拔出这种更严重的破坏形式, 在接下来的反复冲击中, 试样冲击区域逐渐发生整体屈曲, 最后穿透。

从图5a可以看出, 对于含聚氨酯涂层的层合板



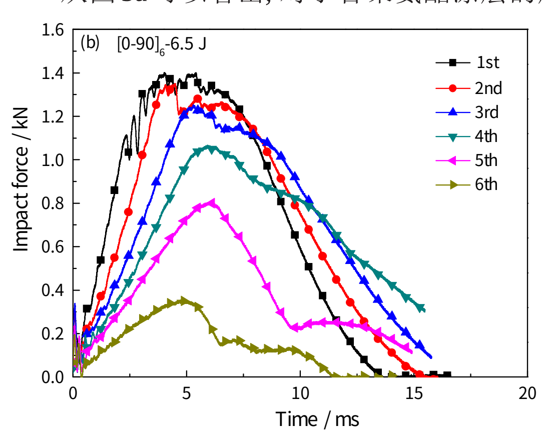
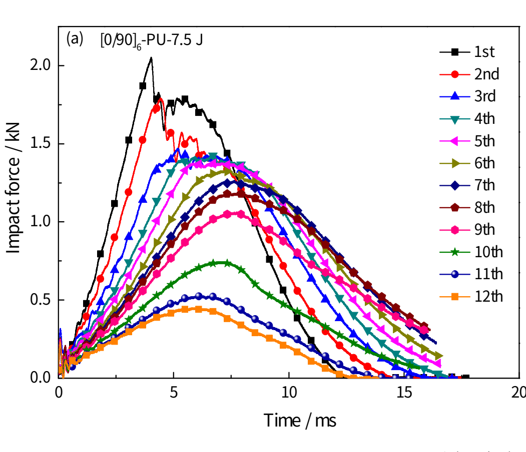


图3 6.5 J反复冲击时的冲击力-冲击时间曲线

Fig.3 Repeated impact force-time curves of $[0/90]_6$-PU (a) and $[0/90]_6$ (b) at 6.5 J



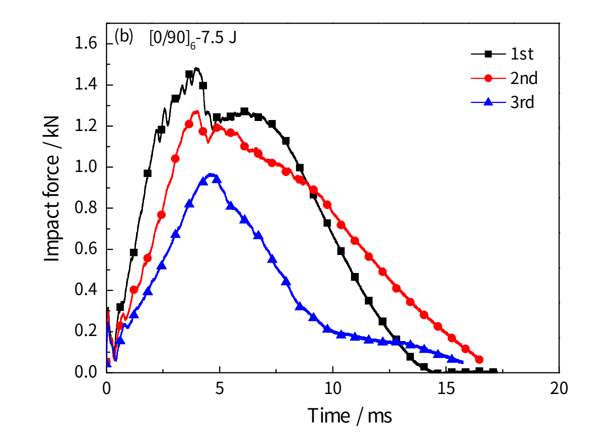
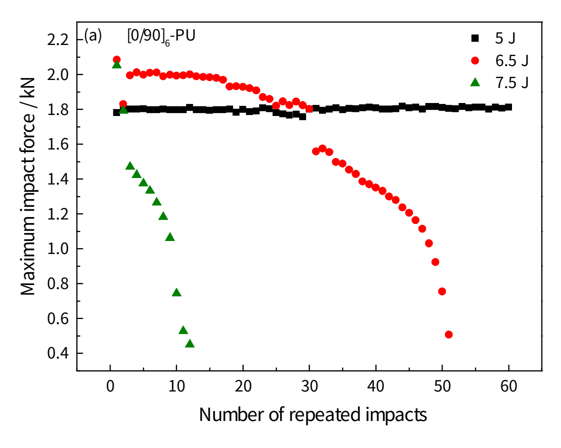


图4 7.5 J反复冲击时的冲击力-冲击时间曲线

Fig.4 Repeated impact force-time curves of $[0/90]_6$-PU (a) and $[0/90]_6$ (b) at 7.5 J



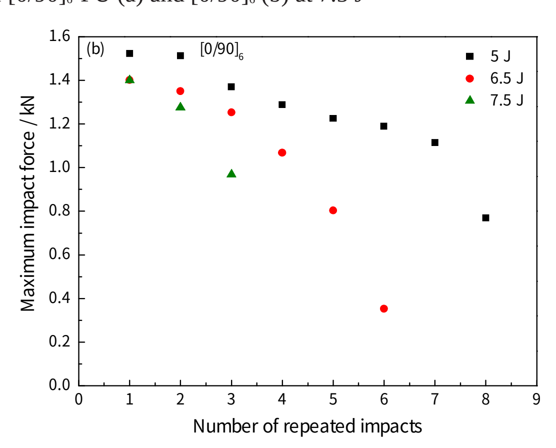
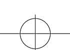


图5 不同冲击能量反复冲击过程中最大冲击载荷随冲击次数的变化

Fig.5 Force versus number of impacts curves of composite plate impacted at different energy levels. (a) $[0/90]_6$-PU, (b) $[0/90]_6$



来说, 当冲击能量为5 J时, 试样的冲击载荷峰值基本不变, 不同冲击次数的冲击载荷-时间曲线基本重合; 当冲击能量升为6.5 J时, 最大冲击载荷随着冲击次数的增加先下降后迅速上升, 接着缓慢下降, 最后快速降低, 直到试样完全穿透。在这个过程中: 第一次下降是因为试件冲击背面树脂开裂, 之后最大冲击载荷增大是因为当冲击能量较小时, 大部分冲击能量被聚氨酯涂层吸收, 聚氨酯涂层在反复冲击过程中被逐渐压实, 使之密实化从而提供一个更坚硬的表面, 导致冲击载荷增大, 在随后的反复冲击过程中, 最大冲击力缓慢下降的原因是复合材料层合板分层和冲击背面树脂裂纹的扩展使试件的刚度缓慢下降, 聚氨酯层经过多次冲击后吸能微弱, 冲击能量几乎全部被层合板吸收, 试样的最大冲击力开始快速降低; 当冲击能量为7.5 J时, 此时冲击载荷曲线呈一直急剧下降的趋势, 这是因为当冲击能量增大, 超过了聚氨酯涂层的吸能阈值, 大部分冲击能量快速传递到复合材料层合板, 使层合板出现纤维断裂, 在之后的反复冲击中试样损伤扩展很快, 直到完全穿透。对于裸板$[0/90]_6$, 如图5b, 随着冲击能量的增大, 冲击载荷峰值反而降低, 这是因为冲击能量越大, 层合板破坏程度越大, 冲头作用于层合板上的接触力反而变小, 冲击载荷峰值随冲击次数的增加而减小, 而且下降的速度越来越快, 冲击能量完全作用于层合板, 超过了层合板的弯曲变形能力, 试样冲击背面纤维断裂, 破坏速度更快。

结合表2可知, 当冲击能量为5 J、6.5 J和7.5 J时, 对于$[0/90]_6$试样, 达到完全穿透时的冲击次数分别为8次、6次和3次, 而对于$[0/90]_6$-PU试样, 达到完全穿透时的次数分别为远大于60次、51次和12次。含聚氨酯涂层试样完全穿透需要的冲击次数比裸板提升的倍数随冲击能量的增大而逐渐减小, 这说明随着冲击能量的增大聚氨酯涂层对复合材料层合板抗反复冲击性能的影响越来越小, 在一定范围的冲击能量下, 聚氨酯涂层可以对复合材料层合板的抗反复冲击性能有显著的改善。

表2 不同冲击能量反复冲击穿透$[0/90]_6$和$[0/90]$-PU_6时的次数

Table 2 Total number of perforation for $[0/90]_6$ and $[0/90]_6$－PU at different energy levels

$[0/90]_6$ Impact energy	No. of drops to perforation	$[0/90]_6$-PU_6 Impact energy	No. of drops to perforation
5 J	8	5 J	>60
6.5 J	6	6.5 J	51
7.5 J	3	7.5 J	12

2.3 不同厚度层合板的反复冲击

分别对三种厚度的复合材料裸板和含聚氨酯涂层的层合板试样进行反复冲击, 冲击能量都为7.5 J, 直到试样完全穿透。

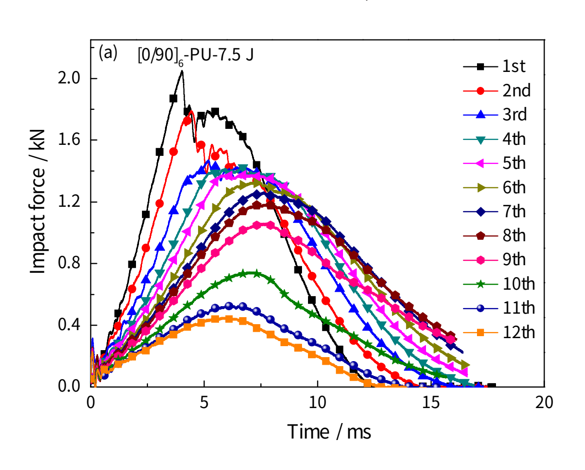
从图6a、7a、8a可以看出, 在7.5 J的冲击能量下, 随着层合板厚度的增加, 最大冲击力逐渐增大, 冲击接触时间逐渐减小。对于$[0/90]_6$-PU和$[0/90]_7$-PU来说, 当冲击能量为7.5 J时, 第一次冲击曲线达到最大冲击力时均出现锯齿形波纹。从图6a和9a看出, $[0/90]_6$-PU的冲击背面出现纤维断裂的现象, 初次冲击产生的破坏比较严重, 造成层合板强度的大幅度下降, 在随后反复冲击过程中, 试样的破坏速度越来越快。从图7a和9b看出, $[0/90]_7$-PU的冲击背面沿着纤维方向有微小的树脂开裂, 但这不是损伤的主要形式, 试样强度下降小, 在随后冲击中, 冲击产生的应力波可以从裂缝中释放, 当裂纹扩展到一定程度时因受到经纬纱交织单元的影响而不再延伸, 纤维开始断裂, 冲击点附近区域发生弯曲变形, 纤维拔出, 破坏速度才开始加快。观察图8a和9c可以发现, 在7.5 J的冲击能量作用下, 第一次冲击后, 曲线呈左右对称的形状, 试样表面无损伤, 这是因为层合板越厚, 它的抗弯曲变形能力越大, 试样发生弹性变形, 冲击能量大部分被聚氨酯涂层吸收, 在多次冲击后, 聚氨酯层出现凹陷, 逐渐致密化, 弹性减弱, 此后冲击能量大部分被层合板吸收, 导致层合板出现树脂开裂, 其随后的过程与$[0/90]_7$-PU类似, 而且试样破坏的速度更加缓慢。

观察图6b、7b和8b可以看出, 当冲击能量为7.5 J时, $[0/90]_6$、$[0/90]_7$、$[0/90]_8$均在第一次冲击时出现锯齿状的波纹, 观察试样可以发现, 裸板均发生了不同程度的损伤, 而且随着层合板厚度的增加, 损伤程度越来越小, 但是破坏速度均比同厚度含聚氨酯涂层的层合板快。

图10a−10c是$[0/90]_6$-PU、$[0/90]_7$-PU和$[0/90]_8$-PU三种不同层合板厚度试样的冲击载荷峰值-冲击次数-吸收能量曲线, 从图中可以看出, 三种试样的冲击载荷峰值和吸收能量随着冲击次数增加的变化趋势大体一致, 冲击载荷峰值的变化大概分为三个阶段, 在第一阶段冲击载荷峰值急剧下降, 这是因为碳纤维的拉伸强度大于压缩强度, 在冲击过程中位于冲击背面的压缩区首先发生微屈曲和剪切变形, 使冲击背面纤维断裂和扭结, 导致

冲击载荷峰值迅速下降。对于$[0/90]_7$-PU和$[0/90]_8$-PU，前十次冲击载荷峰值基本保持不变是因为冲击能量为7.5 J时试样并没有出现纤维断裂的现象，只是冲击背面树脂开裂的微小的破坏形式，没有引起冲击载荷峰值的变化，随着冲击次数增加，树脂裂纹变大，逐渐产生纤维断裂。第二阶段冲击载荷峰值随着冲击次数缓慢下降，在这个阶段试样主要是弹塑性变形和分层的扩展，最后阶段冲击载荷峰值第二次急剧下降，这是因为处于拉伸区的纤维断裂，最终试样完全穿透而破坏。而吸收能量的变化情况与冲击载荷峰值的变化情况完全不同，只有两个阶段，第一阶段吸收能量基本保持不变，当试样开始穿透时，吸收能量开始急剧下降，直到完全穿透。

由于不同厚度的层合板试样的超声C扫描图像大致相同，所以图11只列举了$[0/90]_8$和$[0/90]_8$-PU在



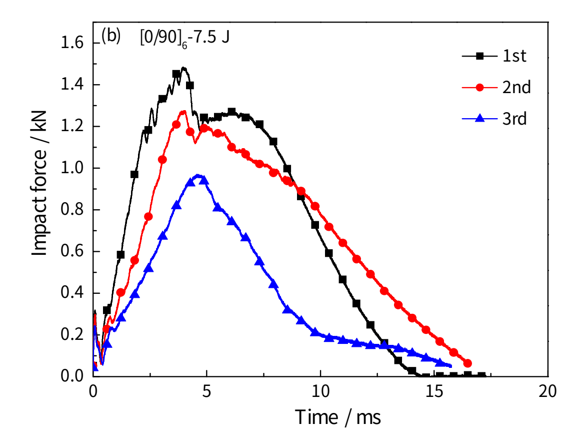
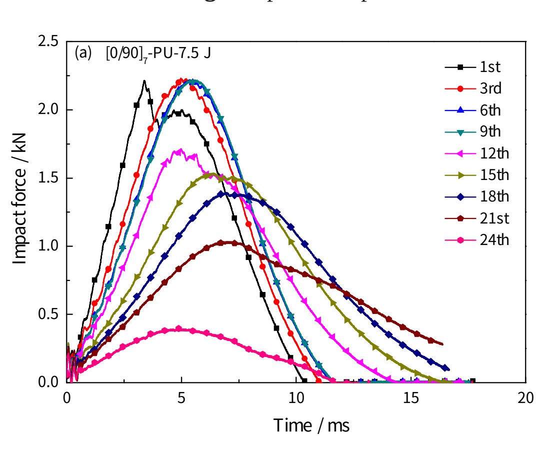


图6 7.5 J反复冲击$[0/90]_6$-PU (a) and $[0/90]_6$ (b) 的冲击力-冲击时间曲线

Fig.6 Repeated impact force-time curves of $[0/90]_6$-PU (a) and $[0/90]_6$ (b) at 7.5 J



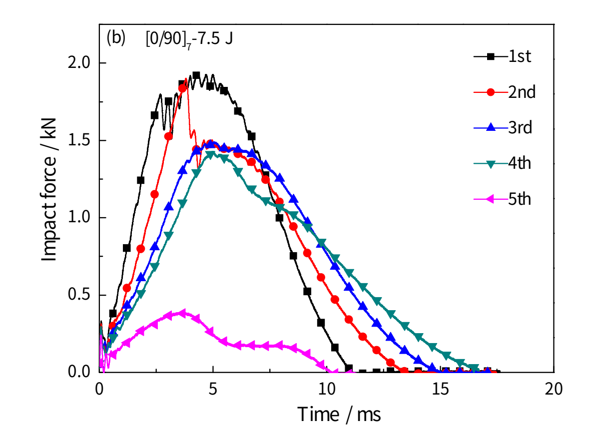
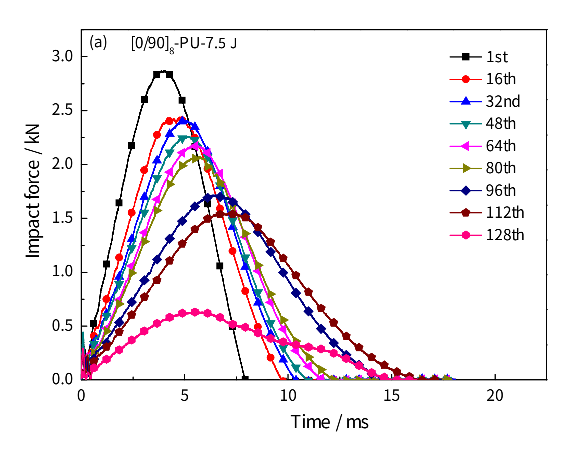


图7 7.5 J反复冲击$[0/90]_7$-PU (a) and $[0/90]_7$ (b)的冲击力-冲击时间曲线

Fig.7 Repeated impact force-time curves of $[0/90]_7$-PU. (a) and $[0/90]_7$ (b) at 7.5 J



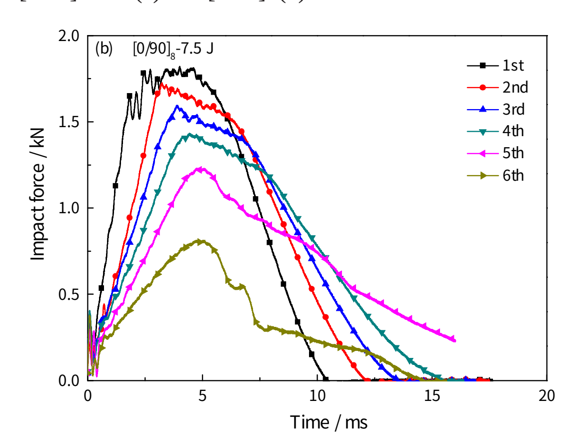


图8 7.5 J反复冲击$[0/90]_8$-PU (a) and $[0/90]_8$ (b) 的冲击力-冲击时间曲线

Fig.8 Repeated impact force-time curves of $[0/90]_8$-PU (a) and $[0/90]_8$ (b) at 7.5 J

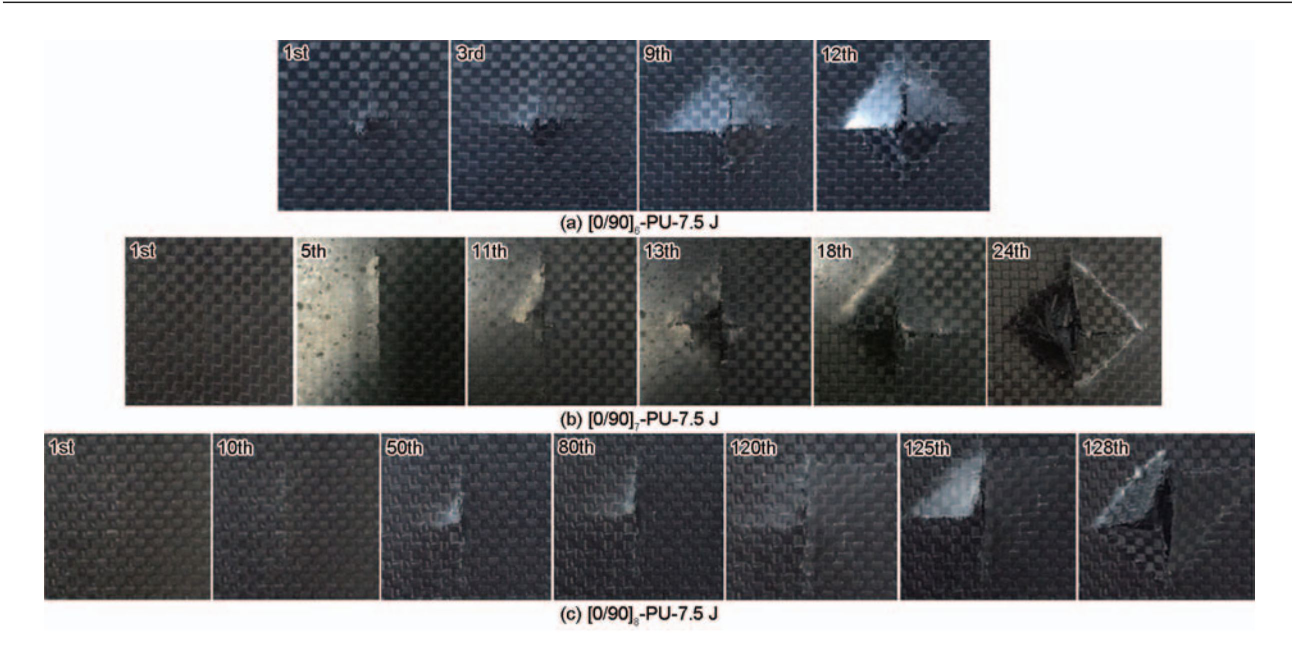


图 9 不同层合板厚度试样在 7.5 J 反复冲击过程中冲击背面损伤图

Fig.9 Picture of damage progression of specimen with different thickness repeatedly impacted at 7.5 J

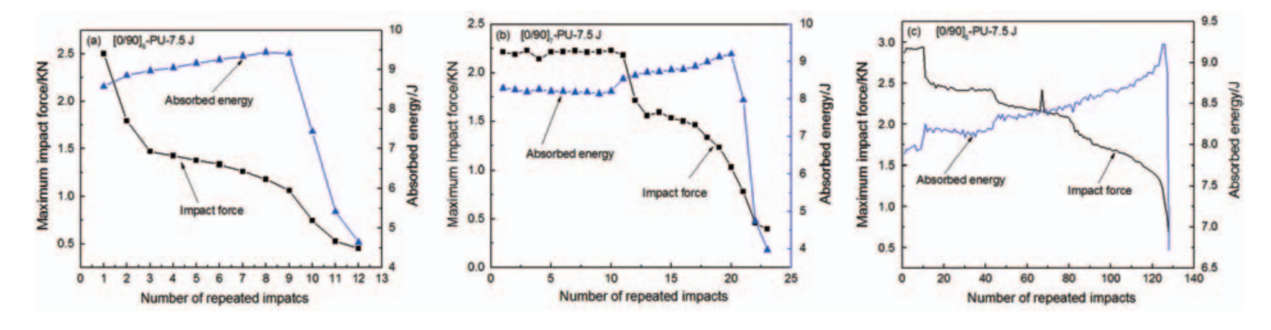


图 10 不同厚度聚氨酯层合板的冲击载荷-冲击次数-冲击能量曲线

Fig.10 Force-impact number-absorbed energy on different thickness laminates with PU

7.5 J 反复冲击过程中的超声波 C 扫描图像, 从图中可以看出, 对于[0/90]8, 随着冲击次数的增加分层损伤图像由近似呈圆形逐渐变成菱形; 而对于[0/90]8-PU, 随着冲击次数的增加, 图像大致呈不规则的椭圆形, 椭圆形长轴沿冲击背面单层纤维方向, 椭圆形长轴长度基本不再增加, 而短轴长度开始加速增加, 最后图像成为不规则的四边形。由此可见, 聚氨酯涂层改变了层合板分层扩展的方向, 而且抑制了层合板分层的扩展。从图 12 中可以看出, 裸板试样的初次冲击后分层损伤面积比聚氨酯涂层试样略大, 说明聚氨酯涂层基本不影响复合材料层合板分层的产生; 对于裸板试样来说, 试样的分层面积随冲击次数的增加先缓慢增大后快速增加, 而且厚度小的层合板分层面积扩展更快, 完全穿透时分层面积更大。对于聚氨酯喷涂复合材料层合板试样完全穿透时的分层面积明显小于对应裸板的分层面积, 而且分层面积增加特别缓慢。对[0/90]6-PU 试样的分层面积随冲击次数基本呈线性增加; 对于[0/90]7-PU 的分层面积的增加可以分为三个阶段, 第一阶段分层面积迅速扩展, 第二个阶段, 分层面积增长变得缓慢, 第三个阶段分层面积又开始增加, 但是增加的速度比第一阶段缓慢; 对于[0/90]8-PU 试样的分层面积的增加分为两个阶段, 第一阶段分层面积增加迅速, 第二阶段分层面积增加缓慢。可见聚氨酯对厚的层合板分层扩展的抑制作用更明显。

根据上述分析, 结合表 3 可知, 在 7.5 J 的冲击能量下, 对于 12 层、14 层和 16 层裸板试样, 完全穿透需要冲击分别为 3 次、4 次和 6 次, 层合板厚度的增加对裸板的抗反复冲击性能提升不明显; 而 12 层、14 层和 16 层含聚氨酯涂层的试样达到穿透分别需要冲击 12、24 和 128 次, 相比于裸板试样, 分别提高了 4 倍、5 倍和 22 倍, 试样完全穿透时需要的冲击次数明显增加, 层合板厚度增加对含聚氨酯涂层的层合板抗反复冲击性能提升显著。

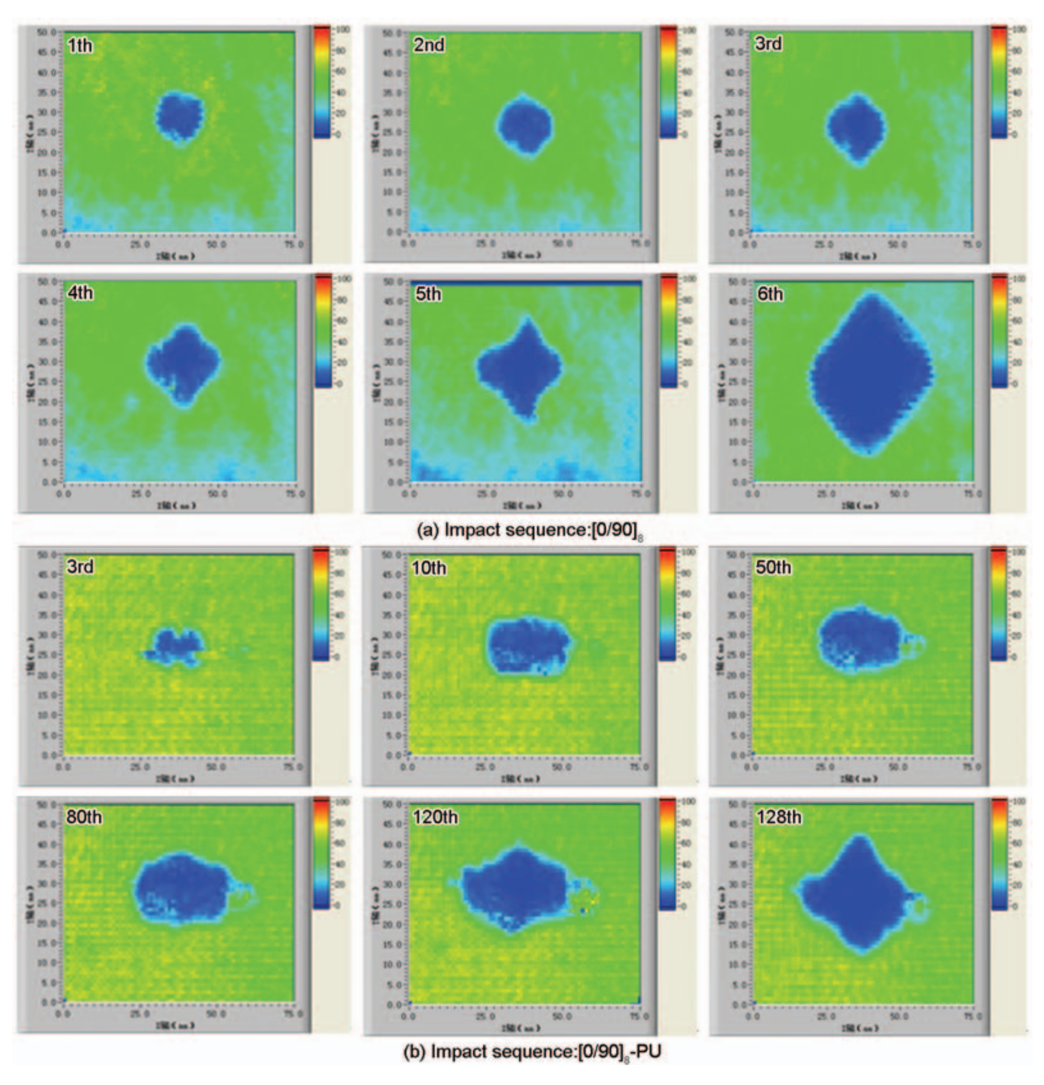


图 11 [0/90]₈和[0/90]₈-PU 反复冲击后的C扫描图像

Fig.11 C-Scan images of damage progression of repeatedly impacted on $[0/90]_8$ (a) and $[0/90]_8$-PU (b)

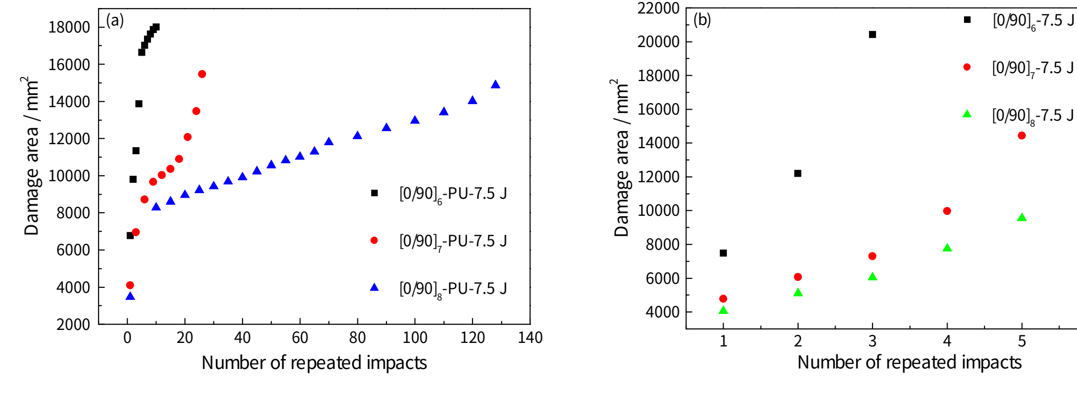


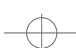
图 12 不同层合板厚度试样的损伤面积随冲击次数的变化

Fig.12 Variation of damage area with impact number for different thickness of samples

表 3 不同厚度的试样完全穿透需要的冲击次数

Table 3 The total number to perforation of specimens with different thickness

Laminate	No. of drops to perforation	Laminate	No. of drops to perforation
$[0/90]_6$	3	$[0/90]_6$-PU	12
$[0/90]_7$	5	$[0/90]_7$-PU	24
$[0/90]_8$	6	$[0/90]_8$-PU	128



3 结　论

1. 聚氨酯涂层对复合材料层合板抗反复冲击性能的影响随着冲击能量的增大而逐渐减弱。在一定冲击能量范围内, 聚氨酯可以完全保护复合材料层合板在反复冲击过程中不受损伤; 随着冲击能量的增大, 聚氨酯的作用越来越小。

2. 聚氨酯涂层对不同厚度复合材料层合板抗反复冲击性能影响不同。随着层合板厚度增加, 层合板的破坏速度越来越慢, 聚氨酯对复合材料抗反复冲击性能的影响越来越显著。

3. 聚氨酯涂层改变了复合材料层合板反复冲击过程中分层的产生, 而且使层合板分层的扩展方式发生变化, 减缓了分层的扩展。

参 考 文 献

1 Cesim Atas, Onur Sayman, An overall view on impact response of woven fabric composite plates, Compos. Struct., **82**, 336(2008)

2 WANG Wensha, YAN Jianhua, GU Hailin, Investigation on impact properties of 2-D triaxial hybrid-braid laminated composites, Fiber Reinforced Plastics/Composite, 5, 47(2015)
(王文莎, 阎建华, 顾海麟, 混杂编织层合复合材料低速冲击性能研究, 玻璃钢/复合材料, **5**, 47(2015))

3 O. S. David-West, D. H. Nash, W. M. Banks, An experimental study of damage accumulation in balanced CFRP laminates due to repeated impact, Compos. Struct., **83**, 247(2008)

4 Celal Evci, Müfit Gülgeç, An experimental investigation on the impact response of composite materials, Int. J. Impact Eng., **43**, 40 (2012)

5 Hiroshi Saito, Isao Kimpara, Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate, Compos.: Part A, **37**, 2226(2006)

6 Ercan Sevkat, Benjamin Liaw, Feridun Delale, Basavaraju B. Raju, Effect of repeated impacts on the response of plain-woven hybrid composites, Compos: Part B, **41**, 403(2010)

7 K. Azouaoui, Z. Azari, G. Pluvinage, Evaluation of impact fatigue damage in glass/epoxy composite laminate, Int. J. Fatigue., **32**, 443 (2010)

8 HAO Kouan, WANG Zhenqing, ZHOU Limin, Impact behaviors and damage modes of composites under low-velocity impact with different layup thicknesses, Applied Mathematics and Mechanics, **34**(7), 661(2013)
(郝扣安, 王振清, 周利民, 不同铺层厚度复合材料的低速冲击特性与损伤模式研究, 应用数学和力学, **34**(7), 661(2013)

9 XIE Zonghong, LIU Haihan, ZHANG Zilong, Prediction on low velocity impact damage of interlayer-toughened composite laminate , Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, **45** (5), 686(2013)
(谢宗蕻, 刘海涵, 张子龙, 层间增韧复合材料层合板低速冲击损伤预测, 南京航空航天大学学报, **45**(5), 686(2013))

10 Giovanni Belingardi, Maria Pia Cavatorta, Davide Salvatore Paolino, Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates, Int. J. Impact Eng., **35**, 609(2008)

11 Sandrine Petit, Christophe Bouvet, Alain Bergerot, Jean-Jacques Barrau, Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield, Compos. Sci. Technol., **67**, 3286(2007)

12 Ercan Sevkat, Benjamin Liaw, Feridun Delale, Basavaraju B. Raju, Effect of repeated impacts on the response of plain-woven hybrid composites, Compos.: Part B, **41**, 403(2010)

13 W. A. de Morais, S. N. Monteiro, J. R. M. d'Almeida, Evaluation of repeated low energy impact damage in carbon-epoxy composite materials, Compos. Struct., **67**, 307(2005)

14 P. Rahmé, C. Bouvet, S. Rivallant, V. Fascio, G.Valembois, Experimental investigation of impact on composite laminates with protective layers, Compos. Sci. Technol., **72**, 182(2012)

15 HE Wei, GUAN Zhidong, WANG Jin, Experimental investigation of impact on composite laminates with protective layers, Acta Materiae Composite Sinica, **31**(2), 485(2014)
(何　为, 关志东, 王　进, 带表面防护层复合材料层合板的低速冲击及冲击后压缩性能试验研究, 复合材料学报, **31**(2), 485(2014))

